



Повышение Эффективности Гидротурбины

1. Владимир Мируашвили
2. Александр Харибегашвили

Received 2nd Jan 2023,
Accepted 3rd Feb 2023,
Online 20th Mar 2023

¹ Научно-исследовательский центр
сельского хозяйства, Департамент
агротехники, Тбилиси, Грузия

² Телавский Государственный
Университет, Грузия, Факультет
точных и естественных наук, Телави,
Грузия

Аннотация: в статье рассмотрены вопросы гидроэнергетики, проанализирован рабочий процесс гидротурбины Каплана, выявлены её недостатки, которые не дают возможность максимально повысить её эффективность. Для повышения эффективности гидротурбины предложена новая принципиальная схема гидротурбины, которая отличается от широко известной гидротурбины Каплана тем, что постепенно по направлении движения воды увеличивается радиус лопастей рабочего колеса (РК), её кожуха, а угол подъёма плоскости лопастей уменьшается, также уменьшается радиус ступицы РК так, что „живое“ сечение гидротурбины возрастает соответственно уменьшения скорости движения воды. В обоих концах вала РК-а расположены подшипники, что улучшает её работоспособность, а радиус вытяжной трубы увеличен, что со своей стороны повышает её эффективность.

Ключевые слова: электроэнергия, гидроэлектростанция, гидротурбина, рабочее колесо, эффективность.

В мире ежедневно увеличивается численность населения и её жизненный уровень, что непосредственно связано с увеличением потребности в электроэнергии. Электроэнергию человечество получает из различных возобновляемых энергетических источников, таких как: реки, гейзерные воды, морские волны и их течения, ветер, солнечная энергия. Также используются невозобновляемые источники энергии, включающие ископаемые топлива - уголь, нефть, природный газ и ядерное топливо. Следует отметить, что себестоимость производимой электроэнергии, зависит от многих факторов, в частности от затраты на добывание таких энергетических средств, как газ, уголь, нефть, ядерное топливо. Поэтому получение тепловой электроэнергии обходится дороже, чем получение гидравлической электроэнергии [1], кроме этого гидроэлектростанции более экологичны, приносят меньше вреда природе, чем теплоэлектростанции. Ещё меньше вреда природе наносят малые

гидроэлектростанции, вред от них можно считать несущественным [2], но и выработанная мощность от них - малая.

Поставленная цель: Повышение эффективности гидротурбины.

Материалы и методы: Рассмотрение гидротурбины Каплана, её отрицательных и положительных сторон, создание турбины с большим КПД (Коеффициент Полезного Действия).

В литературных источниках дано выражение для установления мощности гидротурбины [3]

$$N_y = Q_p H_p g \eta \text{ кВт} \quad (1)$$

Где Q_p - пропускная способность воды в ГТ-ах, м³/с.,

H_p - рабочий напор воды, м.

g - ускорение свободного падения, м/сек².

η - коэффициент полезного действия (КПД)

Со своей стороны

$$H_p = \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g}, \text{ м} \quad (2)$$

Где V_1 скорость воды до вхождения в соприкосновение с лопастями рабочего колеса (РК) (до вхождения в РК), м/сек;

V_2 скорость воды после выхода из соприкосновения с лопастями РК-а (после выхода из РК), м/сек.

Если выражение (2) поставим в (1)-ое, то получим

$$N_y = Q_p \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \eta \text{ кВт} . \quad (3)$$

Из выражения (3) вытекает, что мощность ГТ, в том числе Каплана, прямо пропорционально разности квадратов скоростей воды до вхождения в РК и после выхода из неё.

Согласно литературным данным в современных ГТ КПД равен $\eta = 0,8/5-0,92$, у лучших образцов ГТ КПД достигает $\eta = 0,94-0,96$ [4], что не соответствует действительности, так как при движении воды в гидротурбине несёт большие потери энергии.

Анализ рабочего процесса ГТ, который приведён в литературных источниках показывает, что вода при движении в ГТ-е, имеет следующие потери энергии воды [4].

1. **Гидравлические потери.** В процессе преобразования энергии потока в энергию на валу турбины часть h располагаемого напора H расходуется на преодоление различных гидравлических сопротивлений (трение внутри жидкости и о стенки проточной части, вихреобразование при обтекании потоком элементов проточной части и др.).

В частности, гидравлические потери возникают:

- При движении воды в спиральной камере, в процессе которого постепенно меняется направление движения воды и уменьшается скорость движения воды;
- Из-за турбулентного движения воды в зоне турбины;
- При ударе воды на направляющие лопасти
- При трении воды на поверхности направляющих лопастей;

- При ударе воды на вращающиеся лопасти рабочего колеса (РК);
 - При трении воды на поверхность РК;
 - При трении воды на обтекатель РК;
2. **Объемные потери.** В проточной части турбины не весь расход участвует в процессе преобразования энергии. Например, в реактивных гидротурбинах часть воды протекает через зазоры между вращающимся рабочим колесом и сопряженными элементами. Протечки q полезной работы не совершают и характеризуют объемные потери.
3. **Механические потери** представляют собою часть энергии $\Delta N_{\text{Мех}}$, теряемой на преодоление трения в направляющем подшипнике гидротурбины, подпятнике (половина потерь в упорном подшипнике относится на долю генератора), уплотнениях вала, а также на привод механизмов, связанных с валом гидротурбины.
4. **Основные потери** энергии воды связаны с тем, что вода после прохода РК обладает значительной скоростью в виде её горизонтальной и вертикальной составляющих, и, следовательно, энергией, большую часть которой можно усвоить повышением эффективности гидротурбины.

Вода вначале к лопастям РК подаётся под углом β , значение которого для нормальной работы РК должен удовлетворять условию $\beta < \alpha_1$ (Рис. 1) [5];

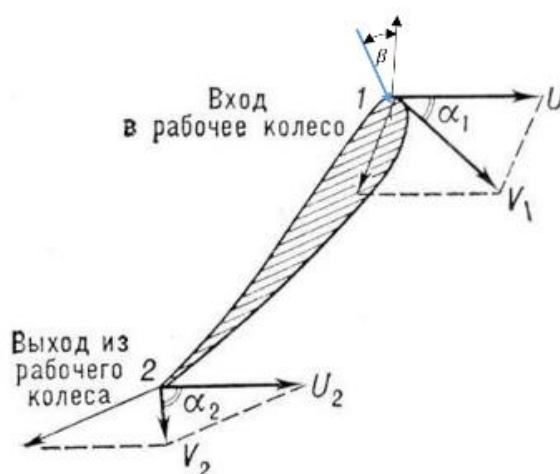


Рис. 1. Схема изменения угла наклона лопасти РК от начала до её конца и угол подачи воды в начало лопасти.

В существующих РК Каплана в начале лопасти, угол наклона её поверхности относительно горизонта $\alpha_1 = 30^\circ$, который к концу РК увеличивается и $\alpha_n = 60^\circ \div 65^\circ$, тем самым постепенно уменьшается сопротивление лопасти движению воды в сторону конца РК. [1, 5-8]

Для нормальной работы РК и целиком ГТ необходимо, чтобы горизонтальная составляющая скорости V_r от абсолютной скорости V_{ab} удовлетворяло следующему условию

$$V_r \geq 2\pi R_{cp} n, \quad (4)$$

Где R_{cp} средний радиус „живого“ сечения РК, м; n – частота вращения РК, об/мин⁻¹.

В противном случае РК остановится.

Со своей стороны R_{cp} равна

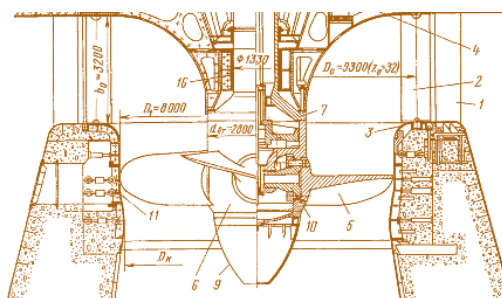
$$R_{cp} = \sqrt{\frac{R^2 + r^2}{2}}, \quad (5)$$

где R наружный радиус лопасти РК, м;

r - внутренний радиус лопасти РК, т. е. радиус ступицы, м.

В современных ГТ-ах n меняется в пределах $n = 300 \div 3000$ об/мин⁻¹ [7-10].

В некоторых больших ГЭС-ах наружный диаметр лопастей РК-а равен $D=8\,000$ мм, а внутренний диаметр $d = 2\,000$ мм, (см. рис. 2) [1, 7-10], тогда средний радиус „живого“ достаточно большой.



$D=8\,000$, $d =$

Рис. 2. Разрез гидротурбины Каплана, вид спереди и её размеры, мм.

Если рассмотрим скорости воды и РК в зависимости от нагрузки РК получаем такую картину (см. Рис. 3). При проходе воды в зоне размещения РК, вода частично скользит, а частично вращается совместно с РК-ом. Так как вода является активным, а РК пассивным ао взаимодействии, связь между скоростями и их направлениями хорошо видна из треугольников скоростей воды в зоне расположения РК (см. Рис. 3) [11].

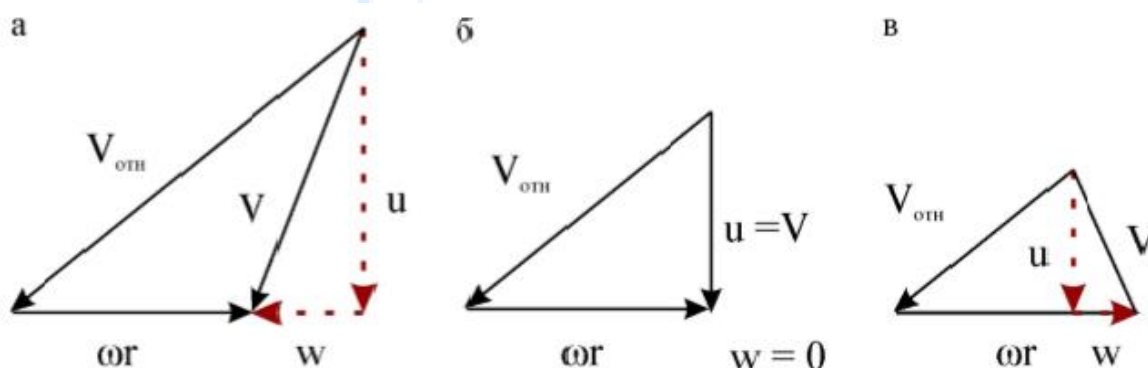


Рис. 3. Треугольники скоростей воды в зависимости от нагрузки на РК, а - режим частичной нагрузки, б - оптимальный режим, в - режим высокой нагрузки.

Следует отметить, что чем меньше нагрузка приходится на РК, тем меньше скорость скольжения воды на поверхности лопасти РК и наоборот.

Как видно из этих графиков скоростей, скорость скольжения воды на лопасти РК прямо пропорционально нагрузке РК-а.

Из выше изложенного вытекает, что потери энергии воды при проходе ГТ, несколько раз превышает 5%.

Результаты.

Для увеличения отбора энергии от движущей в турбине воды, нами разработана новая принципиальная схема (см. рис. 4 Б) РК, которая отличается тем, что лопасти выполнены в виде винта Архимеда с постепенно уменьшающимся шагом - углом подъёма и постепенно увеличивающимся радиусом.

Поставленная цель – повышение эффективности - достигается тем, что при вхождении воды в касание с РК-м, её абсолютная скорость уменьшается, т. к. часть энергий воды передаётся лопастям РК-а, кроме этого скорость воды постепенно уменьшается в постепенно увеличивающемся „живом“ сечении кожуха, которая играет роль дополнительной отсасывающей трубы и увеличивает эффективность турбины.

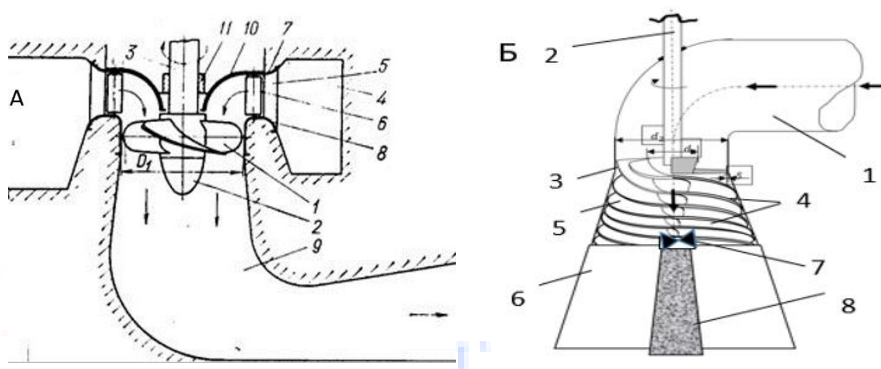


Рис.4. А, схема ГТ колеса Каплана: 1. лопасти РК-а, 2. Ступица РК-а, 3. вал РК-а, 4. спиральная камера, 5-6-7-8 направляющие лопасти со своим креплением, 9. отсасывающая труба, 10. кожух водонаправляющей камеры, 11. манжета. Б. принципиальная схема предложенного РК-а: 1. трубопровод для подачи воды, 2. вал гидротурбинного колеса, 3. ступица РК, 4. лопасти колеса, 5. камера РК, 6. вытяжной трубопровод, 7. опорный подшипник, 8. опора подшипника.

При этом вода встречается с наклонно выполненными лопастями РК-а, которые дополнительно отбирают энергию у воды, т. к. воде при движении к концу РК-а приходится преодолевать постепенно увеличивающееся сопротивление в отличие от РК-а Каплана. Соответственно увеличивается передаваемая энергия на РК-о и следовательно уменьшаются горизонтальная и вертикальная составляющие абсолютной скорости тем самым передаваемая энергия на РК-о больше, чем в турбине Каплана.

Т. к. лопасть предложенной турбины более длинной навивки, то вода более длительно воздействует на рабочее колесо, и, следовательно, передаёт больше энергии рабочему колесу. Так как с увеличением радиуса кожуха скорость воды в гидротурбине замедляется, то с целью компенсации данного явления – замедления скорости воды – и отбора большей энергии от воды, движущейся с меньшей скоростью - во-первых, увеличивается радиус лопасти и вода воздействует на постепенно увеличивающуюся площадь лопасти, во-вторых - уменьшается угол подъёма и шаг винта, и, так, как импульс силы и скорость вертикально (или более менее вертикально) движущейся воды переходит в наклонную скорость, энергию и импульс силы воды, которая по реактивному принципу передаёт тот же импульс силы в обратном направлении рабочему колесу, то чем меньше будет μ угол наклона лопасти к горизонтали, тем больший реактивный импульс силы и больше энергии передаст вода рабочему колесу. Вследствие того, что в предлагаемой гидротурбине архимедов винт сверху вниз расширяется и каждая нижняя лопасть шире верхней, то часть воды, проходящая в зазоре между кожухом и рабочим колесом (лопастями архимедова винта) приходит в контакт с нижней более широкой

лопастью (с лопастью с более широким радиусом) и передаёт энергию рабочему колесу т. е. архимедову винту, что также увеличивает эффективность предлагаемой гидротурбины и уменьшает объёмные потери.

В конце РК-а на кожухе присоединена вытяжная труба, сечение которого в предложенном решении больше, чем у турбины Каплана, соответственно её положительный эффект будет больше, чем у вытяжной трубы ГТ Каплана.

Предложенная гидротурбина (ГТ), как и ГТ Каплана, относится к реактивным ГТ-нам, т. е. при работе ГТ, вода частично скользит на поверхности лопастей рабочего колеса, а чём указано выше и при выходе воды из камеры размещения РК-а её скорость движения больше, чем скорость РК-а, что вызывает абсолютную реактивную $F_{аб}$, силу, воздействующую на лопасти РК-а и её горизонтальную составляющую F_r создающую дополнительный крутящий момент, действующий на РК (Рис. 5 А и Б). В предложенном РК (Рис. 5 Б), этот показатель - реактивная горизонтальная сила - несмотря на уменьшённую скорость воды (из-за увеличения радиуса кожуха сверху вниз), за счёт уменьшения угла наклона лопасти РК-а достаточно больше, чем в РК-е Каплана.

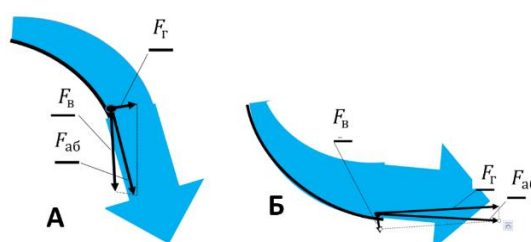


Рис. 5. Схема движение воды : А. В РК Каплана, Б. В предложенном РК

Ниже показаны графики скорости и проиждённого пути (рис. 6), которые показывают разницу в поведении воды в предложенном РК-е и в РК Каплана.

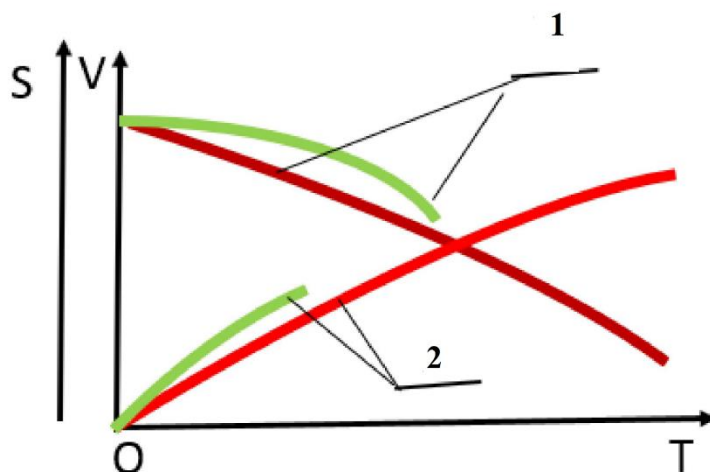


Рис. 6. Графические показатели ГТ Каплана и предложенной ГТ.

- V - Скорость движения воды в зоне расположения РК-а;
- S - Пройдённый путь воды на поверхности РК-а;

графики скорости V и проиждённого пути S: 1- в предложенной ГТ, 2 - в ГТ Каплана

Выводы:

1. Проведен анализ существующих ГТ Каплана, выявлены их недостатки и причины этих недостатков.
2. Разработана совершенно новая принципиальная схема ГТ.
3. В предложенном ГТ-е в камере РК-а постепенно растёт сечение между лопастями - „живое“ сечение, что создаёт дополнительный эффект вытяжной трубы, а также уменьшает объёмные потери.
4. Т. к. по направлению движения воды, постепенно растёт радиус РК, т. е. растёт плечо силы, развиваемой водой на РК-е, то соответственно растёт крутящий момент и мощность ГТ.
5. Приближение направления воды на выходе из турбины к горизонтальному увеличивает реактивную силу водяной струи и тем самым эффективность турбины.
6. Использование архимедова винта делает предложенную турбину более эффективной при низком диапазоне напора 1-70 м, при этом нижний предел диапазона может быть ещё более низким, чем в гидротурбине Каплана, приближаясь к напору в 1 м и расширяя диапазон напора. Короткий винт будет эффективнее при высоких значениях данного диапазона напора, длинный винт – при низких значениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Е. Елисеев, В. В.Ивашечкин, Н. Н. Линкевич, Гидравлические машины, Минск, БНТУ, 2016 г.
2. Григораш Олег Владимирович ПЕРСПЕКТИВЫ МАЛЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ПРЕДГОРНЫХ И ГОРНЫХ РЕКАХ Научный журнал КубГАУ, №112(08), 2015 года
3. В. М. Иванов, В. Н. Юренков, Т. Ю. Иванова, Е. П. Жданов, Т. О. Klein, К вопросу о методике расчёта прочной части осевых гидротурбин гидроэнергетических установок малой мощности. ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4/2 2010
4. Гидроэлектростанции. Лекции ГМ2. Саяно-Шушенский Филиал Сибирского Федерального Университета. - Электронный ресурс. - Режим доступа: <https://studfile.net/preview/6757133/page:3/>
5. Справочник по гидротурбинам: В. Б. Андреев, Г. А. Броновский, И. С. Веремеенко и др.; Под общ. ред. Н. Н. Ковалева. — Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1984.
6. Гидротурбина Большая советская энциклопедия в 30-и т., - 3-е изд. – М.: Совет.
7. Энцикл., 1969 – 191086 . - Электронный ресурс. - Режим доступа: <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/010/346.htm>
8. Козлов А.Н., Козлов В.А., Ротачева А.Г. К59 Гидравлические электрические станции: Учебное пособие / сост. А.Н. Козлов, В.А. Козлов, А.Г.Ротачева – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2017. – 372 с.
9. «Энергетика: история, настоящее и будущее» Книга 3, Гидротурбины и обртимые гидромашины. - Электронный ресурс. - Режим доступа: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-3/part-2/sectoin-5/5-2>
10. Гончаров А. Н. Гидравлическое оборудование гидроэлектростанций и его монтаж. Учебник для учащихся гидроэнергетических и энергостроительных техникумов. Москва, «Энергия», 1967.

11. Г.И. Топаж, Лопастные гидромашины и гидродинамические передачи, Политехн. ун-т, Санкт-Петербург, 2011. Электронный ресурс. - Режим доступа: <https://elib.spbstu.ru/dl/2/3399.pdf/download/3399.pdf>
12. С. Г. Скрипкин, Исследование нестационарных явлений при о двухфазных течениях в элементах проточной гидротурбины, Диссертация на соискание учёной степени. Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук - Электронный ресурс. - Режим доступа: <http://www.itp.nsc.ru/files/20201214102335/Dissertatsiya%20Skripkin%20SG.pdf>

